

Optimización de los peajes en un corredor completamente tarifcado para sociedades con distintos ingresos

Alejandro Ortega

Doctorando, Universidad Politécnica de Madrid, España

José Manuel Vassallo

Profesor, Universidad Politécnica de Madrid, España

Juan Ignacio Pérez

Profesor, Universidad Politécnica de Madrid, España

RESUMEN

El problema de la tarificación vial ha sido estudiado en diversas ocasiones. Existe un amplio consenso en que para lograr el máximo bienestar social, los usuarios deben internalizar las externalidades que producen y no perciben a través de un peaje. Sin embargo, dicho peaje puede perjudicar a los usuarios con bajos ingresos. Dependiendo de la función objetivo a optimizar (por ejemplo, maximizar el bienestar, maximizar la equidad social, la amortización de la construcción de la carretera, etc) el peaje óptimo podría variar sustancialmente. La literatura académica acerca de los peajes, la eficiencia y la equidad es vasta y diversa. Sin embargo, hemos encontrado una deficiencia en dicha literatura sobre el peaje óptimo, en corredores donde una carretera y una autopista con diferentes características de calidad compiten para capturar el tráfico. Particularmente no se ha obtenido ninguna investigación acerca del establecimiento del peaje que maximice el bienestar social para distintas distribuciones del valor del tiempo de viaje (VTT), caracterizadas por su media y varianza. Por ello, el principal objetivo de la investigación es obtener la influencia que tiene la distribución de la renta de una sociedad sobre el peaje óptimo. La presente ponencia se divide en cuatro apartados diferentes. En el primero se realiza una revisión bibliográfica. Seguidamente se expone la metodología, caso de estudio y algoritmo realizados. En un tercer apartado se explican los resultados obtenidos, y por último, se obtienen una serie de conclusiones.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La tarificación a coste marginal de una carretera consiste en hacer que el usuario pague únicamente los costes marginales que ocasiona con su circulación. Este tipo de tarifa es la más eficiente desde un punto de vista económico, y con ella se alcanza el máximo bienestar social. Este punto óptimo se alcanza cuando el precio hace que cada usuario perciba el coste marginal de acceder a la infraestructura. Esto es, el usuario solamente paga por el coste adicional ocasionado que no internaliza (Izquierdo y Vassallo, 2001).

Sin embargo, dicha tarificación no puede alcanzarse de forma práctica porque, entre otros motivos, requiere que todos los sistemas relacionados tengan igualmente una tarificación a coste marginal, lo que no se suele dar en la práctica (Prud'Homme, 1999). No obstante, esto no ha resultado en ningún impedimento para que varios autores estudien dicha tarificación, así como redes de transportes particulares en la que existen cierto tipo de

restricciones al tráfico. Por ejemplo, Verhoeff y Small (1999) analizaron las consecuencias de tarificar con la segunda mejor opción (una alternativa viaria sin tarificar) con heterogeneidad bajo gestores públicos y privados de la infraestructura. El propio Verhoeff (2002) analizó una red más compleja que la anterior red de transporte más compleja en la que se incluye parking de pago y libre del mismo, y carreteras de peaje y libres, focalizando los resultados en las diferencias entre la tarificación *first –best* y *second –best*. En los trabajos de Liu y McDonald (1998) se busca la tarificación *second – best* incluyendo periodo punta de demanda y valle. Yang y Zhang (2003) determinan dónde se debe poner el peaje, a quién hay que ponérselo y cuál sería la cantidad del mismo en una red de transportes con restricciones. Por último, una de las investigaciones más recientes al respecto se centra en los costes a largo plazo en redes de transporte congestionadas (Verhoeff, Kih y Sheperd, 2010). En la presente ponencia solamente se ha incluido una pequeña parte de la literatura académica revisada sobre tarificación y eficiencia económica. Sin embargo, es importante destacar que no hemos podido encontrar ninguna investigación en la que se abarque el estudio del peaje óptimo para usuarios con distintos niveles de ingresos.

2. METODOLOGÍA, CASO DE ESTUDIO Y ALGORITMO

El problema que se desarrolla consiste en optimizar el peaje para los usuarios de un corredor con una autopista y una carretera paralela, ambas tarificadas, de forma que la eficiencia asignativa sea máxima; esto es, que el coste social sea mínimo. La ecuación o función objetivo que debe minimizarse se compone de un total de cinco términos diferentes:

$$SC = UC + EC + HOB + GB \quad (1)$$

Donde:

SC – Es el Coste Social. Se trata de la función objetivo que debe ser minimizada.

UC – Es el coste del viaje para los usuarios. Se compone de cuatro términos: tiempo de viaje, peaje, gasolina y mantenimiento del vehículo.

EC – Son las externalidades que producen los vehículos con su circulación. Es la suma de los costes ambientales, como por ejemplo las emisiones de gases nocivos o ruido, y el coste de los accidentes.

HOB – Es el resultado de operación para la empresa que gestiona y opera la autopista. Son los ingresos derivados de los peajes menos el coste de mantenimiento de la vía.

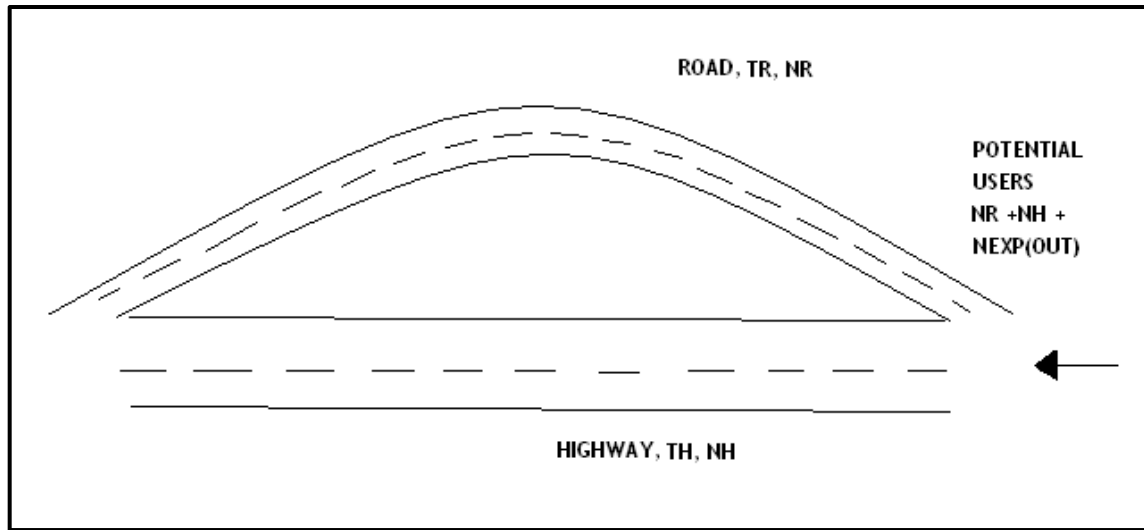
GB – Es el balance que tiene el Gobierno o Administración Pública encargada de la gestión y conservación de la carretera convencional. Es la diferencia entre los ingresos por los impuestos al carburante y los gastos por el mantenimiento de la carretera convencional.

Las principales características del sistema de transportes que se estudia son las siguientes:

- La red interurbana de transportes elegida es muy simple: una autopista de peaje y una carretera convencional paralela entre un origen A y un destino B. No existen modos ni medios de transporte alternativos. Este tipo de red de transportes es muy similar a las condiciones que existen en algunas regiones para viajar entre un par

origen – destino en un corredor concreto. La figura siguiente (1), puede ayudar a clarificar la red estudiada.

Figure1. Transport network selected



- Se considera que los usuarios potenciales de ambas vías son no habituales. Los usuarios no conocen ni intuyen las condiciones de tráfico que presentará el corredor cuando viajen y por tanto, planifican su viaje asumiendo condiciones de flujo libre en ambas vías. De esta forma, el tiempo de viaje que exceda de la condiciones de flujo libre no lo tendrán en cuenta cuando tomen la decisión de viajar y se considera una externalidad del modelo. No obstante, se trata de una externalidad que los propios usuarios internalizarán finalmente, ya que el excesivo tiempo y coste de gasolina repercute en ellos de forma automática.
- Estos usuarios potenciales decidirán sobre la base de tres aspectos: valor del tiempo de viaje (VTT) y coste de la gasolina esperados con condiciones de flujo libre y, peaje en ambas alternativas.
- A efectos de cálculo la demanda representada por los usuarios potenciales se divide en 100 grupos diferentes. La suma de todos los usuarios potenciales compondrá el tráfico potencial, de forma que dependiendo de sus características socioeconómicas podrán permitirse o no el viaje entre A y B. Así, cada uno de los 100 grupos tendrá un 1% del tráfico potencial y una VTT y un límite de gasto en transporte diario diferentes. Si el coste esperado en condiciones de flujo libre excede dicho límite, entonces el grupo no viajará y el tráfico real será menor que el tráfico potencial. De lo contrario, deberá decidir si viajar por la autopista o por la carretera.

Una vez explicadas de forma somera las principales características del modelo, se describen a continuación detalladamente las ecuaciones que conducen a la obtención del Coste Social (SC). Comenzamos por definir los índices i y j . El primero de estos índices, i , es un subíndice que hace referencia al número de estratos o grupos sociales en los que se encuentra dividida la demanda potencial. Indica cada uno de los 100 grupos de usuarios potenciales que dependiendo de su VTT elegirán viajar o no. Por lo tanto, $i = 1, \dots, n$ con $n = 100$. El segundo de los índices, j , representa las distintas opciones que tienen los usuarios que han decidido viajar. Este superíndice puede tomar dos valores: H si eligen

viajar por la autopista o R si la opción elegida es la carretera. Por último, faltaría por clasificar a los usuarios potenciales que no viajan. Para ello es necesario añadir un criterio de expulsión; si el coste variable esperado del viaje supera cierto límite, entonces el grupo de usuarios no viajará. Pero si por el contrario este coste esperado de gasolina más peaje no alcanza dicho límite el grupo viajará. La ecuación (2) expresa esta condición:

$$\text{Si } T^j + GC^j > \theta * I_i \forall j, j \rightarrow N_i = N_{i,exp} \text{ no viajan} \quad (2)$$

En la expresión anterior T^j es el peaje en la opción de viaje j , GC^j es el coste de gasolina en € con flujo libre (sin congestión) en la opción de viaje j , θ es el límite de gasto en transporte, I_i es el ingreso del grupo i en una jornada laboral, N_i es el número de usuarios del grupo i y, $N_{i,exp}$ expresa el número de usuarios del grupo i que deciden no viajar. De esta forma los usuarios expulsados se pueden definir como la diferencia entre los usuarios potenciales y los usuarios de ambas vías:

$$N_{exp} = N_{Pot} - (N^H + N^R) \quad (3)$$

Donde:

N_{Pot} - Es la demanda potencial en el corredor; esto es, el número potencial de vehículos o usuarios que podrían circular. Que viajen o no, dependerá de su renta.

N_{exp} - El número de usuarios que son expulsados del sistema de transportes porque no se pueden afrontar el elevado coste que les supone el viaje.

N^H y N^R - Son respectivamente el número de usuarios que viajan por la autopista o la carretera.

Por lo tanto, en el proceso de decisión los usuarios deciden si viajan o no, y por qué vía lo hacen. Una de las cuestiones clave en el problema es conocer cómo se distribuye el tráfico entre las dos vías, ya que los costes son muy diferentes entre las dos opciones. Para ello, una vez tomada la determinación de viajar, el criterio de decisión de los usuarios viene dado por:

$$DC_i^j = T^j + \varphi * GC^j + VTT_i * ETT^j \quad (4)$$

Donde:

DC_i^j - Es el coste de decisión del grupo social i en la opción j .

φ - Es un coeficiente que expresa la percepción del usuario con respecto al coste de gasolina.

VTT_i - Es la valoración del tiempo de viaje del grupo social i . Expresada en €/hora.

ETT^j - Es el tiempo de viaje en horas con flujo libre en la opción de viaje j .

Una vez que los distintos grupos de usuarios han decidido si viajan o no, y por qué vía circular en función de sus respectivos DC_i^j , obviamente elegirán la opción con menor coste, el resto del problema es consecuencia de estas dos decisiones. El modelo desarrollado consta de unas variables de entrada (distribución de VTT, N_{pot} , Peajes) en las que se centrará el análisis, unos parámetros que no variarán (por ejemplo los impuestos pagados a la gasolina o las pendientes de las vías) y unas variables de salida (SC, N_{exp} y reparto del tráfico entre vías). A continuación se describe con mayor detalle el proceso de cálculo

utilizado para la obtención del peaje óptimo y su SC asociado, así como los rangos en los que se estudian las variables seleccionadas y los valores adoptados para cada parámetro. Los parámetros permanecerán invariables y se obtienen de diversas investigaciones. No obstante, si se estimase conveniente estos mismos parámetros pueden ser sustituidos por otros fácilmente. Por el contrario, para elegir el rango de las variables ha sido necesario acudir a varias investigaciones de diversas fuentes, ya que se quiere obtener la influencia de dichas variables sobre el peaje óptimo. De esta forma, los valores de los parámetros y los rangos de las variables que se estudiarán más adelante por medio del algoritmo propuesto son los de la tabla inferior (1):

Table1. Parameters and variables selected.

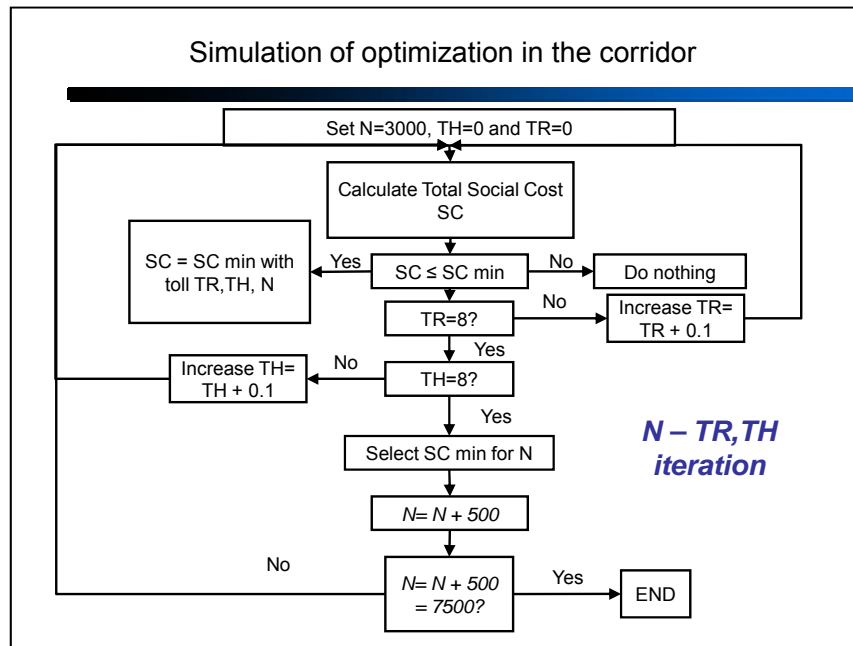
<i>Variable</i>	<i>Valor</i>	<i>Fuente</i>
VTT_i	25 combinaciones con 5 medias (μ) y 5 varianzas (σ^2) diferentes	Elaboración propia tras analizar Small, Winston y Yan (2002); Gutiérrez- Dómenec (2008); Calvo, Cortiñas y Sánchez, (2012);De Rus et al (2010); Ortiz y Cummins (2012)y Fosgerau (2006)
T^H	Rango de 0 a 8€	Elaboración Propia
N	Desde 3.000 a 7.000 veh.	Elaboración Propia tras estudiar Kraemer et al. (2004)
<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Fuente</i>
$DIST^H$	90 Km	Elaboración Propia tras estudiar Vassallo, Ortega y Baeza (2012)
$DIST^R$	100 Km	Elaboración Propia tras estudiar Vassallo, Ortega y Baeza (2012)
Velocidad libre autopista	120 Km/h	Elaboración Propia tras estudiar Kraemer et al. (2004)
Velocidad libre carretera	100 Km/h	Elaboración Propia tras estudiar Kraemer et al. (2004)
CAP^H	2.400 usuarios/carril/hora. 2 Carriles	Kraemer et al. (2004)
CAP^R	1.700 usuarios/carril/hora. 1 Carril	Kraemer et al. (2004)
ϕ	0,9	Elaboración propia tras estudiar Matas, Raymond y Ruiz (2012), y Huang y Burris (2013),
Θ	20%	Litman (2007)

De forma adicional a la tabla superior, es bueno conocer que se ha considerado una penalización para el tiempo de viaje que exceda el flujo libre (Wardmand e Ibañez, 2012), que los impuestos a la gasolina son del 45% y el precio de la misma es de 1,5€ (Ortega, Gómez y Vassallo, 2012), y finalmente para los consumos de gasolina y cálculo de externalidades que los dos tramos son completamente llanos (Vassallo, López y Martínez, 2012; Monzón et al, 2012).

El proceso de cálculo estudia todas las posibles combinaciones de peajes con sus respectivos SC y localizada la pareja de peajes que conduce al mínimo SC, entonces, el número de usuarios potenciales aumenta en 500 y el proceso se repite de nuevo. El algoritmo finaliza cuando se han estudiado todos los escenarios posibles, y obtenido todos los óptimos, incluido el correspondiente al tráfico potencial de 7.000 usuarios. La figura

inferior (2) representa el proceso de cálculo que se lleva a cabo.

Figure 2. Process of simulation of optimization



En la metodología indicada no aparece de forma explícita el coste de la congestión. No obstante, en el proceso de cálculo se tienen en cuenta distintos escenarios de tráfico y así se pueden obtener diferencias tanto en los peajes óptimos como en el coste social dependiendo de la congestión. Por ello, el coste de congestión no debe ser tenido en cuenta, ya que de forma implícita se puede conocer al aumentar el número de usuarios potenciales. Del mismo modo, dicha metodología podría ser mejorada por medio de futuras líneas de investigación. Por ejemplo las mejoras más destacables serían la incorporación de un modelo logit que añadiera más elementos en el criterio de decisión del usuario como el tiempo de viaje real en el caso de usuarios habituales, un criterio de expulsión que incluyera además del dinero gastado en transporte el tiempo invertido, una demanda continua en lugar de una demanda segregada en 100 grupos diferentes y una demostración analítica de la solución óptima del problema. No obstante, el principal objetivo de esta investigación es conocer cómo influye sobre el peaje óptimo la distribución de ingresos de una población y en menor medida el tráfico, y para ello, la metodología y algoritmo presentados son suficientemente robustos.

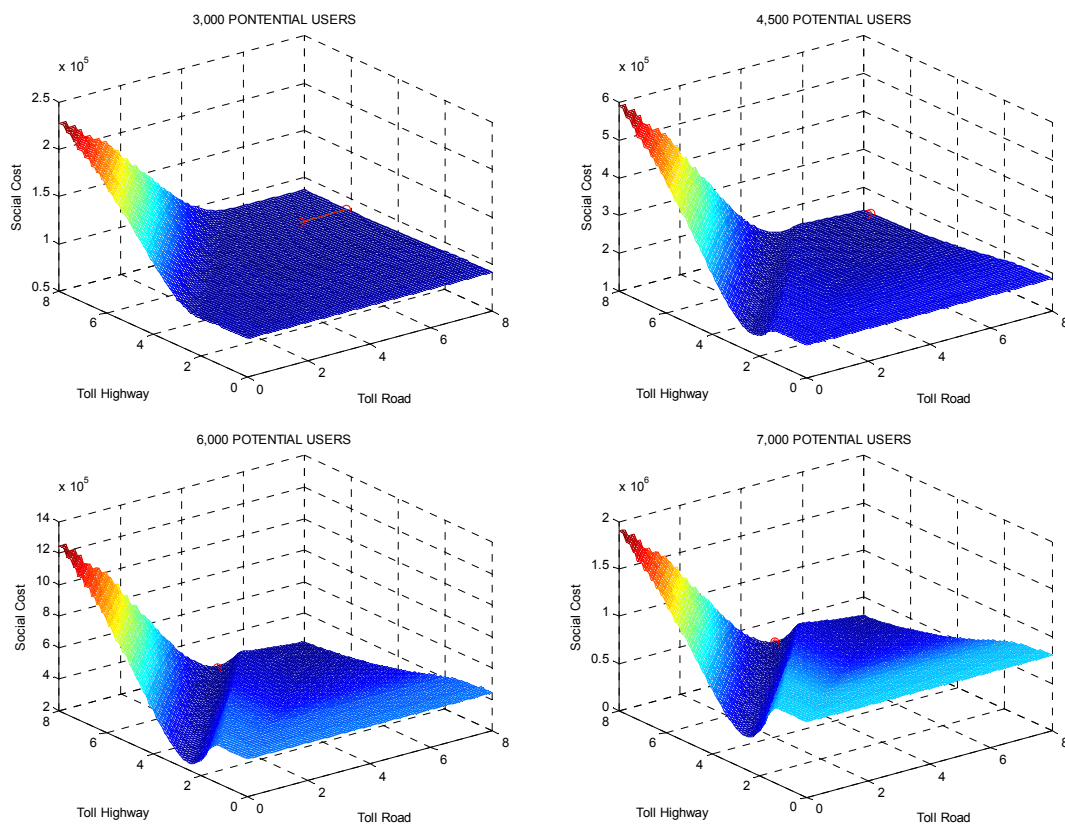
3. RESULTADOS

En los siguientes apartados se analizan los resultados obtenidos. En primer lugar se analiza la evolución del SC para todas las combinaciones de peajes y cuatro niveles de tráfico. En un segundo apartado se estudia la influencia que tiene la media de VTT sobre la combinación de peajes óptimos. En tercer lugar, se repite dicho análisis para el caso de la varianza (o dispersión) de la distribución de VTT. Seguidamente, se comentan las consecuencias sobre los peajes óptimos de variar de forma conjunta tanto la media como la varianza de la distribución de VTT. En quinto lugar, se obtienen los peajes que se aplicarían en el caso de España. Por último, se muestran una serie de conclusiones.

3.1. Evolución del Coste Social según la combinación de peajes

En primer lugar, para conocer cómo obtiene el modelo las combinaciones de peajes óptimos, se representa la figura inferior (3). En ella los ejes horizontales simbolizan los peajes en cada una de las vías, mientras que en el eje vertical aparecen los distintos SC. Esta figura se compone de cuatro gráficos diferentes. En cada uno de ellos se representa el SC dependiendo de la combinación de peajes. La diferencia entre los cuatro gráficos radica en que en cada uno de ellos los cálculos se realizaron con diferentes niveles de tráfico potencial. De esta forma, se puede observar la evolución del SC para cuatro escenarios diferentes de tráfico, desde el flujo libre con 3.000 usuarios potenciales hasta la congestión en el corredor con 7.000 usuarios potenciales. Para el diseño de esta figura se ha elegido un escenario intermedio de distribución de VTT, con una $\mu=19\text{€/h}$ y $\sigma^2=249,28$. Con el objetivo de resaltar el punto o combinaciones de peajes óptimos, se han coloreado en color rojo dichas combinaciones o puntos. Son fácilmente reconocibles, había cuenta de que se encuentran rodeados de colores más oscuros y siempre en la zona de mínimos.

Figure 3. SC depending on traffic and combination of tolls



La primera de las conclusiones que puede obtenerse es que la combinación óptima de peajes depende del nivel de tráfico potencial. Para un escenario con flujo libre, 3.000 usuarios potenciales en el corredor, la combinación de peajes óptimos es aquella en la que el peaje es constante en la autopista y puede tener cierta variabilidad en la carretera. No obstante, en todas las combinaciones la diferencia de peajes debe ser de al menos 0,3€ entre ambas vías, siendo mayor el peaje en la carretera. Así, la tasa de captación de tráfico de la carretera sería nula y habría un 24% de los usuarios potenciales expulsados. Una vez que comienza a formarse la congestión en el corredor, con 4.500 usuarios potenciales, el

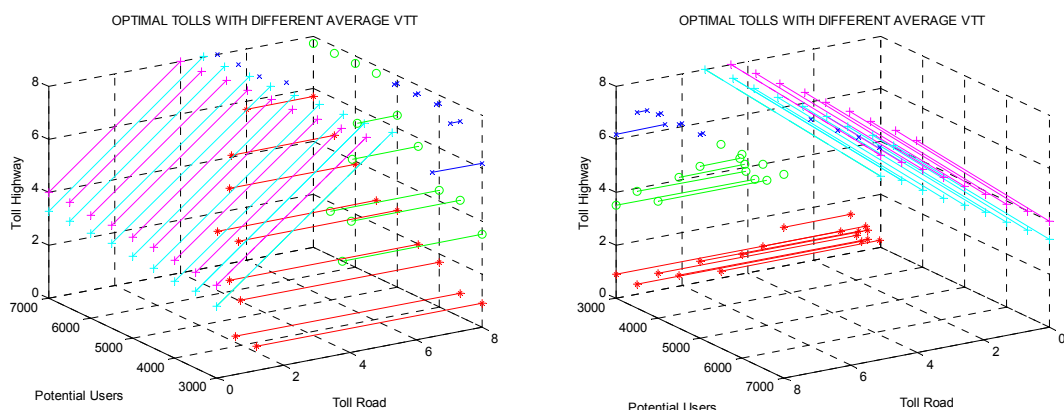
peaje en la autopista debe ser constante, mientras que el peaje de la carretera puede variar dentro de un rango, pero nuevamente la diferencia debe ser de un mínimo de 0,3€. La tasa de captación de la carretera seguiría siendo nula mientras que el porcentaje de expulsados sería máximo (31%) ya que el peaje en la autopista sería más elevado.

La tendencia descrita para los dos escenarios de tráfico anteriores cambia por completo cuando el nivel de usuarios potenciales es cercano a la capacidad del corredor con 6.000. En esta ocasión el peaje en la autopista debe seguir aumentando, hasta situarse prácticamente en su máximo, mientras que el peaje de la carretera debe disminuir desde el máximo que podía alcanzar en los dos escenarios de tráfico anteriores. La combinación de peajes deja de ser una recta para convertirse en un único punto. La tasa de captación de la carretera sería del 27,71% del tráfico total y el porcentaje de usuarios expulsados disminuiría hasta el 17%. Finalmente, cuando el tráfico potencial es superior a la capacidad del corredor, con 7.000 usuarios potenciales la tendencia es la misma que la descrita con 6.000 usuarios potenciales: una única pareja de peajes óptimos con el peaje de la autopista en su máximo posible y el peaje de la carretera en el mismo nivel. Esta combinación de peajes da lugar a una tasa de captación de la carretera ligeramente superior a su capacidad relativa dentro del corredor con un 30,12% y nuevamente el número de usuarios expulsados es del 17% con lo que se sitúa lejos de su máximo posible.

3.2. Efecto de la media de VTT sobre la combinación de peajes óptimos

Para conocer el efecto que tiene la μ de las distribuciones de VTT sobre las combinaciones de peajes óptimos es necesario analizar la figura inferior (4). En ella se han representado para la σ^2 media (249,28) las combinaciones de peajes óptimos con distintos escenarios de tráfico potencial y todas las μ analizadas. De esta forma, se puede aislar el efecto de la media de las distribuciones de VTT sobre los peajes óptimos para diferentes niveles de congestión. Únicamente cabe recordar que el rango de μ analizadas abarca desde los 13€/hora hasta los 25€/hora. Dicha figura inferior se divide en dos gráficos diferentes. En todos ellos se representan las combinaciones de peajes óptimos ya señaladas, pero desde diferentes perspectivas en 3D. Con respecto a los colores, el rojo y el verde indican las μ menores, con 13 y 16€/hora respectivamente. Los colores magenta y cian son las distribuciones con mayor μ , con 25 y 19€/hora. El color azul oscuro es la μ intermedia, con 19€/hora. Esto mismo puede observarse en la leyenda que acompaña a la figura (4).

Figure 4. Optimal tolls for different traffic levels and average VTT



*	13
—	13
○	16
—	16
×	19
—	19
+	22
—	22
—	25
+	25

De la figura anterior resulta necesario distinguir dos casos completamente diferenciados. Un primer caso en el que los usuarios tienen un alto poder adquisitivo y por lo tanto resulta difícil que sean expulsados del sistema de transportes independientemente de la combinación de peajes, y un segundo caso en el que por tener una renta claramente inferior pueden existir grupos de usuarios potenciales que sean fácilmente expulsados. Acompañando a estas dos regiones, existiría una tercera región de transición con una μ intermedia. La primera de las regiones se corresponde con distribuciones de VTT con una μ elevada. En este caso, la combinación óptima de peajes siempre conlleva un aumento de la tasa de captación de la carretera al aumentar el tráfico potencial, y además no existen usuarios expulsados del sistema de transportes. Por ejemplo, aunque pueden existir hasta un 7% de expulsados con la combinación de peajes más altos y $\mu=22\text{€/hora}$, es preferible no hacerlo, ya que desde una perspectiva de bienestar social siempre consiguen internalizar las externalidades que producen a través de los peajes. Además, no existe una única combinación de peajes, por lo que el gestor del tráfico del corredor tiene cierta libertad para implantar la pareja de peajes que desee sin dañar el bienestar social. Únicamente debe mantenerse la diferencia de peajes entre ambas vías, de forma que la tasa de captación del tráfico de la carretera sea socialmente óptima.

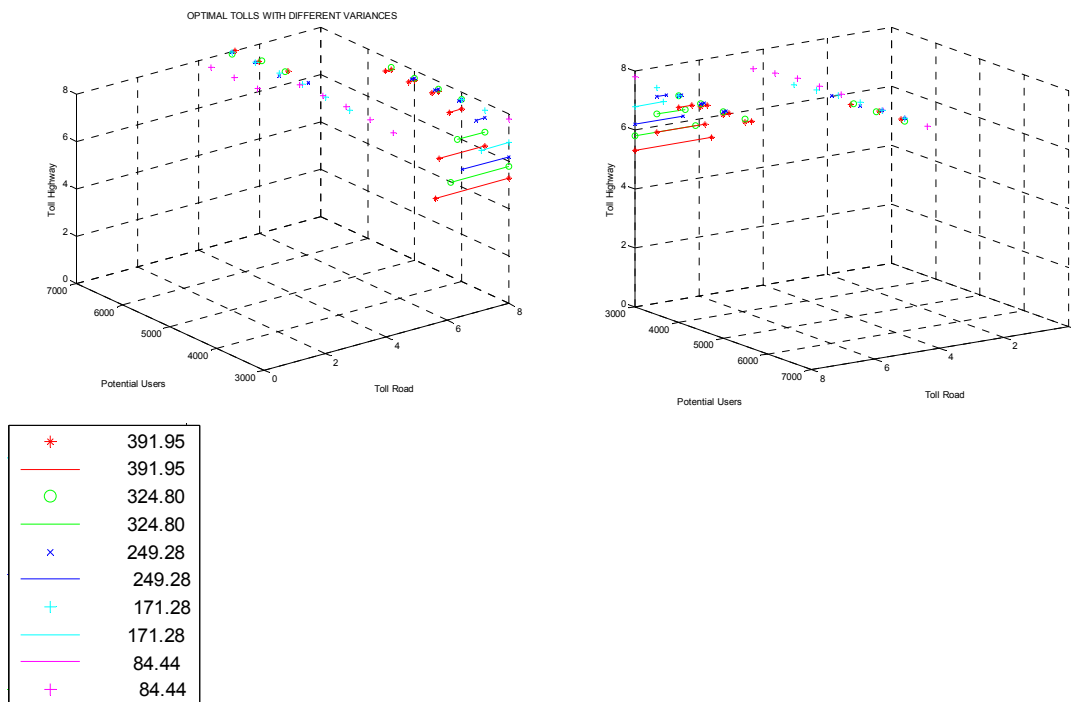
Por el contrario, la segunda de las regiones se da en aquellos casos con una μ más baja, concretamente 13 y 16€/hora. Para distribuciones de VTT con estas medias la combinación de peajes óptima siempre es aquella que hace que exista un gran número de usuarios expulsados del sistema, aunque no tiene por qué llegar al máximo, y que la tasa de captación de la carretera sea nula. En otras palabras, debido a que los usuarios no son capaces de internalizar las externalidades que provocan por medio de los peajes, lo mejor desde el punto de vista del bienestar social es que no viajen. En esta segunda región, una vez fijado el peaje en la autopista, el gestor de la carretera tiene gran libertad para fijar el valor del peaje en dicha vía, ya que únicamente debe conservar un mínimo en la carretera. Por último, hay una tercera región considerada de transición entre las dos anteriores y por lo tanto mantiene características de ambas. Esto es, con tráficos potenciales bajos es más conveniente aumentar el número de usuarios expulsados y que todos los usuarios transiten por la autopista. En esta situación la combinación de peajes óptima no es única para cada nivel de tráfico. Sin embargo, a medida que aumenta el tráfico potencial lo hacen también los usuarios expulsados hasta alcanzar el máximo posible. A partir de ese instante, si se continúa aumentando el nivel de usuarios potenciales, entonces la combinación de peajes óptimos es única y hace que se reduzca el porcentaje de usuarios expulsados a un nivel

intermedio y que aumente la tasa de captación de la carretera hasta que su captación sea ligeramente superior a su capacidad relativa dentro del corredor.

3.3. Efecto de la varianza de VTT sobre el peaje óptimo

Los resultados del apartado anterior pueden analizarse desde otro punto de vista, respondiendo a la cuestión de cuál es el efecto de la σ^2 sobre las combinaciones de peajes óptimos. La figura inferior (5) es análoga a la figura anterior (4), pero con la diferencia de que todas las distribuciones de VTT tienen una misma $\mu=19\text{€/hora}$ y las variables a analizar en este caso son la σ^2 y el tráfico potencial. En el gráfico izquierdo los ejes horizontales indican el peaje en la carretera y el número de usuarios potenciales, y en el eje vertical el peaje en la autopista. El gráfico derecho se trata otra perspectiva en 3D de los mismos resultados. Con respecto a los colores, el rojo y el verde representan σ^2 por encima de la distribución de VTT media, mientras que los colores magenta y cian indican distribuciones con una σ^2 por debajo de la media. La σ^2 medio viene representada por el color azul oscuro.

Figure 5. Optimal tolls for different traffic levels and variance VTT



Antes de abordar el análisis de la figura superior es conveniente resaltar que para un mismo nivel de peajes en sociedades con mayores σ^2 el número de expulsados es mayor. Así, en las distribuciones de VTT más dispersas el número máximo de usuarios expulsados se obtiene con mayores tráficos potenciales, pero no para combinaciones de peajes con valores más altos, ya que en ambos casos este porcentaje máximo de expulsados se alcanza para combinaciones cercanas a 8€ en ambas vías. Dicho de otro modo, en distribuciones con menor σ^2 el máximo porcentaje de expulsados se obtiene con menores tráficos potenciales. Una vez que se alcanza dicho máximo, al igual que sucediera con anterioridad, para maximizar la eficiencia social las combinaciones de peajes tienen menores valores. Por el contrario, en distribuciones de VTT más dispersas el máximo de usuarios

expulsados se obtiene con mayores niveles de tráfico potenciales y entonces los peajes no se reducen tanto como en el caso de las distribuciones más concentradas. Por todo ello, como regla general, no puede afirmarse con rotundidad para todos los casos que menores σ^2 en las distribuciones de VTT conllevan mayores peajes óptimos. Dos de las claves del modelo son el número máximo de usuarios expulsados y los ingresos de aquellos usuarios que pudieran ser expulsados, por lo que resulta necesario incluir en el análisis de la σ^2 la μ . De esta forma, para distribuciones de VTT con una μ baja, en condiciones *ceteris paribus* la combinación de peajes óptimos es mayor para menores σ^2 . Para distribuciones con la μ media, dicha tendencia es solamente válida antes de alcanzar el máximo porcentaje de usuarios expulsados. Una vez alcanzado dicho máximo, la tendencia es la opuesta. Por último, para distribuciones con una μ alta, si se fija el precio en la carretera entonces se cumple que mayores σ^2 conducen a menores peajes óptimos en la autopista. No obstante, este efecto combinado se analiza en profundidad en el apartado venidero.

3.4. Efecto combinado de la media y varianza de VTT sobre el peaje óptimo

A la hora de obtener conclusiones es importante distinguir las tendencias de los peajes óptimos según el porcentaje máximo de usuarios expulsados que se puede alcanzar y a su vez, de los ingresos que tengan aquellos que pudieran ser expulsados. En este sentido, cabe señalar dos regiones claramente diferenciadas. Una región en la que debido a su alto poder adquisitivo, independientemente del nivel de peajes no habrá apenas usuarios expulsados, y otra región en la que la renta de un gran porcentaje de usuarios es baja y por lo tanto, incluso sin ningún tipo de tarificación habrá un gran número de usuarios que no puedan permitirse viajar. A estas dos regiones sería necesario añadir una zona de transición entre ambas. Estos dos aspectos, porcentaje de expulsados y renta de los grupos de usuarios que sí viajan, son claves en el modelo por dos razones. En primer lugar, a mayor porcentaje de usuarios expulsados, para un mismo nivel de tráfico potencial menor será el tráfico real en el corredor, y por lo tanto menor será la congestión. En segundo lugar, si existe un elevado porcentaje de usuarios expulsados es porque no pueden permitirse el elevado coste monetario que les supondría el viaje y, esto significa que los grupos que sí que viajen tendrán también una renta baja. Este hecho puede hacer que con combinaciones en las que viajaran un mayor número de usuarios no pudieran internalizar las externalidades producidas y por tanto, existieran importantes externalidades sin compensar dentro del sistema de transportes.

Tal y como se pudo observar en apartados precedentes, sea cual sea la distribución de VTT, la tendencia de los peajes óptimos es que a medida que aumenta el tráfico potencial, el óptimo conduzca a mayores porcentajes de usuarios expulsados, hasta alcanzar el máximo posible. A partir de ese instante, es más conveniente que viajen más usuarios y se repartan por ambas vías en lugar de viajar el menor número de usuarios posibles pero únicamente por la carretera, tal y como sucedía en la situación anterior. En otras palabras, una vez que por el nivel de tráfico de potencial es inevitable que exista cierta congestión, es mejor que viajen más usuarios para así evitar pérdidas sociales. Por el contrario si dicha congestión es evitable y los usuarios con menor poder adquisitivo no son capaces de internalizar las externalidades que provocan, entonces es mejor que no viajen. Con

respecto a estas dos tendencias, de más o menos usuarios expulsados y un uso exclusivo de la autopista, descubiertas al comparar tanto la σ^2 como la μ y el nivel de tráfico potencial, se pudo comprobar que no existe una regla fija. Sin embargo, si se estudian los resultados en mayor profundidad, se descubre que dicho cambio de tendencia puede situarse en el rango de los 3.000 – 3.500 usuarios reales en el corredor. Por lo tanto, cuando el tráfico real es menor que dicho rango, es mejor aumentar el porcentaje de expulsados y que los usuarios viajen únicamente por la autopista. A partir de dicho nivel de tráfico real, es mejor para evitar pérdidas sociales imponer combinaciones de peajes que no conlleven aparejadas el máximo nivel de usuarios expulsados y que impliquen una mayor captación del tráfico por parte de la carretera.

3.5. Estudio del caso de España

El caso español es de particular interés porque se puede conocer un orden de magnitud del valor que deberían tener los peajes en una región europea. Sin embargo, las lecciones de política que se extraigan de este caso concreto no serán diferentes de las obtenidas con anterioridad, ya que este estudio de caso se encuentra dentro del rango de la media y la varianza de VTT analizados. La siguiente tabla (2) muestra los rangos de peajes óptimos con cada nivel de tráfico potencial para la distribución de la declaración de la renta en España del año 2009, así como sus correspondientes porcentajes de captación de tráfico de la carretera y de usuarios expulsados del sistema de transportes definido. Únicamente cabe recordar que este tipo de distribución es una aproximación a una lognormal, tiene una μ de prácticamente 13€/hora (13,09€/hora) y una $\sigma^2=391,95$.

Table 1. Optimal tolls for the Spanish case

Potential Traffic (Number of users)	Range of optimal price in the toll highway (€). In brackets (€/km)	Range of optimal price in the toll road (€).In brackets (€/km).	Share of traffic in the conventional road (%)	Users pushed out (%)
3,000	1.6 (0.018)	1.9 – 8 (0.019 – 0.08)	0	40
3,500	2.5 (0.028)	2.8 – 8 (0.028 – 0.08)	0	44
4,000	2.5 (0.028)	2.8 – 8 (0.028 – 0.08)	0	44
4,500	2.8 (0.031)	3.1 – 8 (0.031 – 0.08)	0	45
5,000	3.6 (0.04)	3.9 – 8 (0.039 – 0.08)	0	48
5,500	4.4 (0.049)	4.7 – 8 (0.047 – 0.08)	0	51
6,000	5.5 (0.061)	5.8 – 8 (0.058 – 0.08)	0	55
6,500	5.5 (0.061)	5.8 – 8 (0.058 – 0.08)	0	55
7,000	6.9 (0.077)	7.2 – 8 (0.072 – 0.08)	0	59

Tal y conforme se podía prever por las características de la distribución de VTT, las conclusiones que pueden extraerse de la anterior tabla son similares a distribuciones con bajos μ y una σ^2 media, en las que podían existir un elevado porcentaje de usuarios expulsados si la combinación de peajes era la máxima del rango. Concretamente en este caso, el máximo porcentaje de usuarios expulsados sería del 61%. Sin embargo, dicho máximo no se alcanza con ninguno de los niveles de tráfico potencial, ya que en el escenario con mayor porcentaje de usuarios expulsados, dicho porcentaje es del 59% para 7.000 usuarios potenciales. Con todos los niveles de tráfico potencial analizados la

combinación óptima de peajes es aquella en la que el peaje en la autopista es fijo y la diferencia entre ambas vías es de al menos 0,3€. Resulta sorprendente que es mejor que viajen menos usuarios a obtener una mejor distribución del tráfico entre ambas vías. Esto se debe a que los usuarios no son capaces de internalizar por medio del peaje las externalidades que producían en el sistema de transportes.

Por último, si se comparan los valores óptimos de los peajes con los existentes en las vías españolas con características similares, los peajes deberían reducirse en la autopista (un 16,75% en la tarifa punta) y aumentar en la carretera. Eso sí, dicha bajada debería acompañarse de la implantación de cierto peaje en la carretera con una doble finalidad: expulsar a más usuarios del sistema de transporte, sin llegar al máximo posible, y hacer que todo el tráfico circule por la autopista. En este sentido, es importante resaltar que aunque un porcentaje de expulsión del 59% en el óptimo con los mayores niveles de tráfico potencial pueda parecer excesivo, no lo es, habida cuenta de que el porcentaje mínimo de usuarios expulsados es del 31%. Dicho de otra forma, cuando existieran operaciones especiales con grandes puntas de demanda, sería necesario incentivar a los usuarios que pueden viajar pero que tienen un menor poder adquisitivo a viajar fuera de las puntas, y a los que tienen mayor poder adquisitivo obligarles a viajar por la autopista por medio del sistema de precios establecido.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se han explicado la metodología y algoritmo con los que obtener las combinaciones de peajes que maximizan el bienestar social para usuarios no habituales en entornos interurbanos en los que existen dos vías de transporte en un mismo corredor y ambas están tarifadas. El principal objetivo de la investigación ha sido obtener la influencia de tres variables sobre las combinaciones de peajes óptimos. Estas variables son tráfico potencial, valoración media de VTT y dispersión de esta VTT. Tras analizar los resultados del caso de estudio, las lecciones referentes a la política de peajes permiten afirmar que:

- Para una determinada capacidad total en el corredor, y con una relación de capacidades dada, las variables más importantes que determinan el punto óptimo del peaje son el número de usuarios en el corredor, la valoración media del tiempo de viaje y la dispersión de esta valoración. Por lo tanto, las combinaciones de óptimos varían según la región en la que se localicen las vías. Así, los valores de los peajes deben diferir según el tráfico potencial del corredor y la riqueza y cohesión social de los usuarios potenciales de dicho corredor.
- Como norma general se puede decir que a mayor nivel de usuarios potenciales, mayores combinaciones de peajes óptimos. Lo mismo sucede con la media de VTT y con la concentración de dicha distribución de VTT; cuanto más elevadas sean, mayores serán las combinaciones de óptimos.
- El límite a esta regla se da por el porcentaje de usuarios expulsados. Así, cuando hay más usuarios expulsados del sistema de transportes de los estrictamente necesarios para mejorar el bienestar social, entonces es mejor disminuir las combinaciones de peajes óptimos de forma que viajen más usuarios y además lo

hagan por la carretera para aumentar la actividad económica y mejorar la eficiencia social.

- En este sentido, la combinación de peajes óptimos no es siempre aquella que conduce al máximo porcentaje de usuarios expulsados: depende de la distribución de VTT (μ y σ^2) y del nivel de tráfico potencial.
- En regiones en las que los usuarios tengan una renta baja (μ baja), es mejor aumentar el número de usuarios expulsados conforme aumenta el nivel de tráfico potencial. Esto se debe a que los usuarios que son expulsados no son capaces de internalizar las externalidades que producen, máxime cuando al aumentar el tráfico potencial las externalidades derivadas de la congestión son mayores.
- En regiones con rentas altas (μ elevada), independientemente de los valores de los peajes, viajarán la mayoría de los usuarios, por lo que para beneficiar al bienestar social es mejor obtener combinaciones de peajes que repartan el tráfico entre ambas vías de forma que se disminuya la congestión.
- En medio de estas dos regiones se ha encontrado una región de transición en la que ambas conclusiones son válidas. Con tráficos potenciales bajos es mejor aumentar el porcentaje de usuarios expulsados hasta el máximo posible. Con tráficos potenciales elevados es mejor no expulsar a tantos usuarios y repartir el tráfico de forma adecuada entre las dos vías. El límite de tráfico real se puede fijar en el rango de 3.000 – 3.500 usuarios en el corredor. Así, si independientemente de la combinación de peajes el tráfico en el corredor es de aproximadamente la mitad de la capacidad del mismo, entonces es necesario comenzar a distribuir adecuadamente el tráfico, aumentando la tasa de captación de la carretera de forma gradual al tráfico potencial. Desde otro punto de vista, esta misma región de transición puede situarse entre la distribución con una $\mu=16\text{€/hora}$ (medio/bajo) y σ^2 medio para cualquier nivel de tráfico potencial hasta $\mu=22\text{€/hora}$ (elevado) y σ^2 muy elevado con bajos tráficos potenciales.
- En condiciones *ceteris paribus*, a mayor cohesión social (menores σ^2) las combinaciones de peajes óptimos tienen unos valores más elevados. Sin embargo, habida cuenta de las distintas regiones de VTT localizadas, esta regla no es cierta si se comparan distribuciones con alta y baja μ .
- Para el caso de España, los precios de las autopistas deberían reducirse y los de las carreteras convencionales ser superiores, de forma que se desincentivase el viaje aquellas personas con menor poder adquisitivo y a su vez, que los usuarios que sí viajen lo hagan únicamente por la autopista. Dicho de otra forma, es necesario obtener una combinación de peajes que expulse a más usuarios a medida que aumenta el tráfico potencial y que la carretera convencional no tenga vehículos.

Por último, indicar que en sociedades más ricas, los gestores de tráfico en el corredor pueden elegir qué valor del peaje fijar dentro de un importante rango, ya que no dañarán el bienestar social. Esto no sucede así en sociedades con rentas medias o bajas, donde o bien la solución es única, o bien, se debe fijar un precio en la autopista y el de la carretera debe ser un mínimo superior.

5. REFERENCIAS

Calvo, J.; Cortiñas, P. and Sánchez, C. (2012). A study in Spanish regions' poverty: a new methodological perspective. *Advances in Management & Applied Economics*, 2 (1), 163 –183

De Rús, G. et al. (2010). Evaluación económica de proyectos de transporte. Proyecto de investigación del CEDEX.

Fosgerau, M. (2006). Investigating the distribution of the value of travel time savings. *Transportation Research Part B*, 40: 688-707.

Gutiérrez- Dómenec, M. (2008). ¿Cuánto cuesta ir al trabajo? El coste en tiempo y en dinero. *Documentos de Economía “la Caixa”*, nº 11

Huang, C. y Burris, M. (2013). The Short-run Impact of Gas Prices Fluctuations on Toll Road Use. *Transportation Research Board Annual Meeting 92nd*, Washington DC.

Izquierdo, R. y Vassallo, J.M. (2001). Objetivos económicos de la introducción de peajes en carreteras interurbanas. *Revista de Obras Públicas*, 3.413,7-31.

Kraemer, C.; Pardillo, JM.; Rocci, S.; Romana, M.; Sánchez, V. y Del Val, MA. (2003). Ingeniería de Carreteras. Volumen I. Mc Graw-Hill/Interamericana de España, s.a.

Litman, T.(2007). Economic Development Impacts of Transportation Demand Management', *Transportation Research Board Annual Meeting 86th*, Washington DC.

Liu, N. and McDonald, J.F. (1998). Efficient Congestion Tolls in the Presence of Unpriced Congestion: A Peak and Off-Peak Simulation Model. *Journal of Urban Economics*, 44 (3), 352-366.

Matas, A.; Raymond, JL.y Ruiz, A. (2012). Traffic forecasts under uncertainty and capacity constraints. *Transportation*, 39, 1-17.

Monzón A.; Hernandez S.; Nobrino N. y Perez P. (2012). Determinación de la huella energética en la fase de explotación de la autopista. Documento de trabajo. Proyecto de investigación OASIS.

Ortega, A.; Gómez, J. y Vassallo J.M. (2012). El céntimo sanitario, ¿Qué coste ha supuesto para el sector del transporte profesional?. *Revista carreteras*, 183, 18-26.

Ortiz, I. y Cummins, M. (2012). Desigualdad global: la distribución del ingreso en 141 países. Documento de trabajo de política económica y social de UNICEF.

Prud'Homme, R. (1998). La tarification des infrastructures selon Bruxelles. *Transports*, 393, 15-18.

Small, K.A.; C. Winston, y J. Yan (2002). Uncovering the distribution of motorists' preferences for travel time and reliability: implications for road pricing. Working-Paper # 546, University of California Transportation Centre.

Vassallo, JM.; Lopez, E. y Perez-Martinez, PJ. (2012). Do charges to freight trucks and trains in the European union reflect their social marginal costs?: Application to the case of Spain. *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 21 (1), 13–24.

Vassallo, JM.; Ortega, A. y Baeza, MA. (2012). Impact of the Economic Recession on Toll Highway Concessions in Spain. *Journal of Management in Engineering*, 28 (4), 398-406.

Verhoef, E.T. (2002). Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(8), 707-729.

Verhoef, E.T., y Small, K.A. (1999). Product differentiation on roads: second-best congestion pricing with heterogeneity under public and private ownership. Discussion Paper TI 99-066/3, Tinbergen Institute, Amsterdam-Rotterdam.

Verhoef, E.T.; Koh, A, y Shepherd S.(2010). Pricing, capacity and long-run cost functions for first-best and second-best network problems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(7), 870-885.

Wardman, M. e Ibañez, J. (2012) The congestion multiplier: Variations in motorists' valuations of travel time with traffic conditions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46 (1), 213-225

Yang, H. y Zhang, X. (2003). Optimal Toll Design in Second-Best Link-Based Congestion Pricing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1857, 85-92.